

熱量測定の新しい方向

宮 本 道 子

Summary

New Directions in Calorimetry

Michiko Miyamoto

I describe an outline of Prof. William J. Willis's work.

Many of the reactions of in current experiment are detected by measuring all the particles that do have charge or interactions, and using the knowledge of the initial energy to deduce the missing energy and momentum. This is just like the old experiments with classical calorimeters that established the existence of the neutrino in β -decay, but now we are seeing the neutrinos event by event.

Another case is the possible high mass recurrences of the Z, decaying to two electrons. These particular cases have led to concentrated effort to develop electromagnetic calorimeters with energy resolution better than the one or two percent that has been the limit. This resolution should be achieved under the condition of a high energy and high rate experiment such as those at the Large Hadron Collider to be built at CERN.

Prof. William J. Willis 著の “*New Directions in Calorimetry*” をまとめてみました。

A 序 説

物質中での吸収と他のより便利な形への変換によってエネルギーを測定するという考え方は、物理学においては古くからあり、エネルギーの保存則と、熱力学の法則を確立するという役割において知られている。エネルギーの熱への遷移と温度の増加によるその測定は、最も基本的で信頼出来る測定のひとつであると考えられている。放射性崩壊において発生された大量のエネルギーを受け止めるにむずかしく見えるとき、エネルギーの熱量測定は、他の方法によって推測されるエネルギーが真に正しいという証拠を特別に与えることになる。電子崩壊の測定が β -崩壊における、エネルギー損失問題をむきだしにしたのち、熱量測定は、これがエネルギーの保存則の失敗に対応するにちがいないということを示したようなものである。代るべき可能性は物質の大きな区画においてさえ吸収されえない形でエネルギーの放出である。この種の測定におかれる確信はむずかしいニュートリノ概念を受け入れるときに重要である。古典的な熱量測定器、すなわち、信号が検出されると温度が上昇する測定器は、高電力電子ビームによって、なお用いられている。低温での熱量測定における新しい発展は、1 個の低エネルギー粒子の測定に対する重要な技術を用意している。総吸収量によって、粒子のエネルギーを測定する他の仕掛けを、測定された信号が、温度変化のある他の便利な代理であってさえ、“熱量測定器”と呼ぶのが普通である。我々が議論しようとしている信号の型は、イオン化からの荷電と光であるが、しかし音響の信号と化学的変化と輻射損傷が又用いられている。我々が議論している応用は主に高速度衝突実験に対してであるので、我々は速い信号に焦点を合わせる。

B 古典的熱量測定の主題とエネルギーの保存

我々は常に、物質の 1 区画に蓄えられているエネルギーは、温度の増加に正確に相関しているということを、エネルギーの保存則が保証していると考ええる。事実、我々は以下に原子核相互作用をする粒子が含まれているときには、この仮定は大変まちがっていることがわかる。イオン化によって荷電が放出されるような、観測された信号が温度上昇の代理であるとき、信号は厳密にはエネルギーに比例しているとはいえない。なぜならば、エネルギーは連続変数であるが、イオン化は不連続な歩調で進むからである。粒子の運動速度が大きいことによって生ずる与えられた原子のイオン化の事象において、エネルギー損失の変化する断片は、標的原子を励起し、熱を生ずる。もし我々が荷電信号のみを信頼するならば、一定の総エネルギーに対して、荷電信号の大きさに確率散乱がある。これは、イオン化測定検出器において、エネルギー分解能の限界を与える。蓄えられたエネルギーと物質の温度上昇の間には、密接な関係がある。(この都合のよい場合においてさえ、もしエネルギー蓄積過程によって惹起こされた原子核又は化学的荷電があるならば、エネルギーは信号に確率散乱を惹起こしてかなり失われるのである

う。) 温度の測定は、イオン化信号の利用と比較して、改良されたエネルギー分解能を与えることが出来る。もちろん、普通の技術によって得られる雑音水準は、 10^{-15} ジュールの断片のエネルギー蓄積によって惹起こされる温度変化の肉眼に見える物体における測定を許さない。これは、すべての物体の熱容量が絶対零度で零に近づくという状況のためにのみ実用的となる。大変低い温度を生ずる技術を工業技術が用意しているので、温度感覚は、例えば Fig 1 に示されているように、単一 X 線によって蓄えられているエネルギーの測定に良い感度を示している。エネルギー分解能は、イオン化測定における確率の変動の限界よりかなり良い。

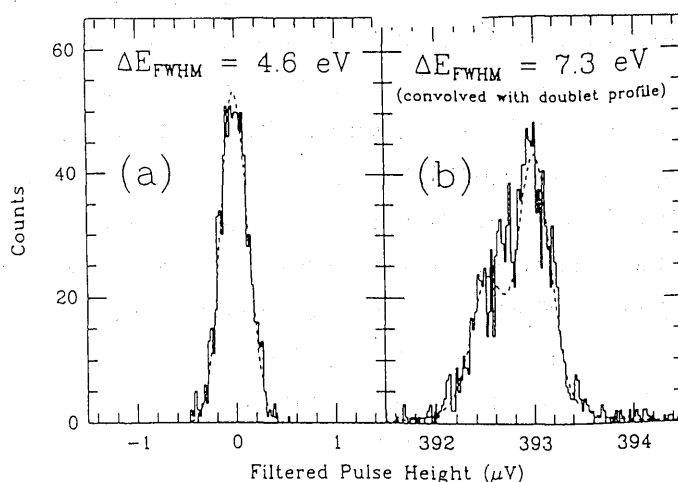


Figure 1 The x-ray spectrum recorded by a bolometric detector.

検出器の質量は、低熱容量を得るために小さくしなければならない。さいわい、2, 3 グラムの小さな検出器は、キロボルト光子のエネルギーを含むために十分であり、例えば、分解能の改善が特にいちじるしい。そのような検出器の応答時間は、温度測定によって惹起こされる雑音によってばかりでなく、基本的に音速によって支配されるエネルギーが熱になる時間によって限定される。速度の限界は Herz の大きさであるがしかしこれは、小さな検出器で X 線測定に対する天文学的应用又は、ダークマターの研究を支持するに十分である。

C イオン化の仮定と標本仮定

速い信号を得るために、我々は透過線上の電氣的信号や光の信号のような高い伝播速度を持つ物理量を測定しなければならない。イオン化が熱量測定器に蓄えられたエネルギーと独特な関係を持つべきであるということを確かにする一般的な原理はない。それをする仮定は、仮定の正確さが熱量測定器の分解能を限定する仮定を構成する。例えば、それらの範囲の終り近くで、遅い重い粒子は、イオン化荷電の再結合や信号の損失の原因となる、イオン化の高密度を持つ。類似の効果は、ある種のシンチレーターにおいて起こる。重い粒子の一部分は、高エネルギーシャワーにおける粒子の種類によっている。強い相互作用をする粒子のシャワーの中には、多くの遅い陽子があり、一方、電磁的シャワーは本質的に電子のみを持つ。遅い粒子の数

は、シャワーによって異なり、入射粒子とさえも異なる。これは特に強い相互作用をする粒子のエネルギー分解能を限定する。

あるイオン化又はシンチレーター熱量測定器が感度の良い均一の区画から作られている一方、密度の高い吸収をする感度の高い物質をところどころに入れることは通常のことになっている。シャワー粒子の道筋にそって、可能だけ度々エネルギーを標本する感度のよい要素の間の距離を最小にする幾何学が用いられている。標本化の変動は、電磁的シャワーに対する分解能を限定し、そして Fig 2 に示されているように、標本化がやや良いというのでなければ、強い相互作用をする粒子のシャワーさえ分解能を限定する。

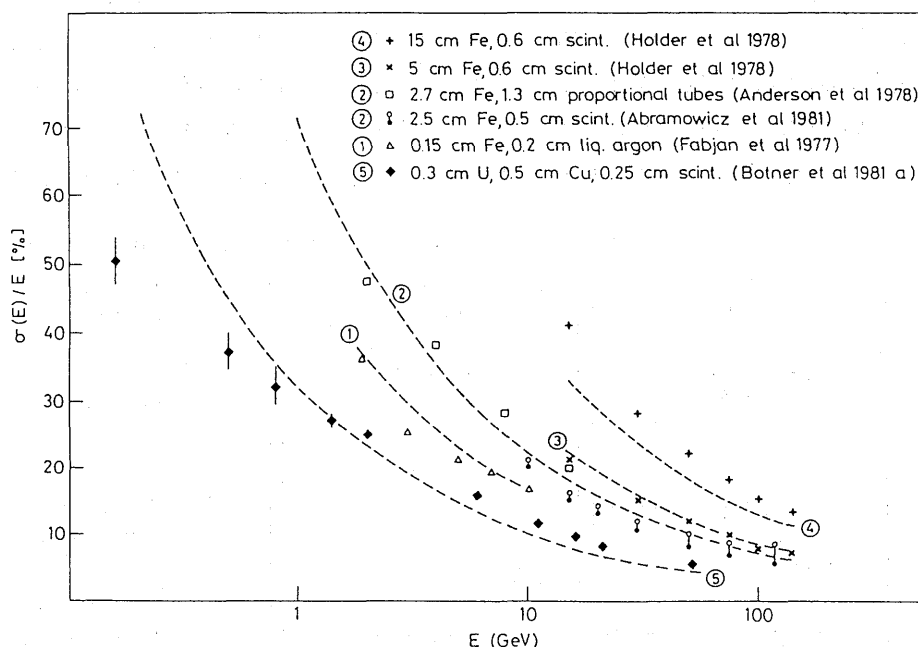


Figure 2 The influence of sampling granularity on hadron resolution.

D 原子核相互作用粒子とエネルギーの保存則

前章では、我々はイオン化として現われないエネルギーの断片の変動を無視してきた。これは、原子とそれらの荷電をつうじて相互作用するが、原子核とはほとんど相互作用しない電子やミュオンのような粒子に対しては良い近似であろう。吸収体に入射する光子又は電子は1%以下の原子核によって電子と光子のカスケードシャワーを生成する。原子核はほとんど含まれておらず、そしてエネルギーが数 MeV に近づくとき、イオン化荷電の変動は10eV の大きさの平均イオン化エネルギーと関連する。

もし入射粒子が、原子核と相互作用をする核子や中間子であるならば、新しい種類の検出エネルギー損失が生ずる。ミュオンのようなより質量の重い粒子は、電磁的カスケードを受けないがしかし、ミュオンのものでない粒子は、原子核と強い相互作用をする。強い相互作用をする粒子が原子核と中心的衝突をするとき、同じ原子核内に核子の原子核カスケードを惹起

こす。これは、しばしば陽子と中性子の放出とともに原子核全体の主な分裂にみちびく。これら核子を一緒に保っている束縛エネルギーは、明らかに失われる。観察された信号が熱であるかどうかさえ、熱量測定器ではわからない。Fig 3に示されているように、入射エネルギーの断片のかなりの数を吸収して、カスケードにおける2次粒子は、もっと原子核の分裂をすすめる。鉄の原子核の総束縛エネルギーは1GeVの約半分である。カスケードの中に生成された正のパイオンとカオンはエネルギーを失って、ついに同様に失われるニュートリノへ崩壊することを止める。代理の信号は、電子と光子のカスケードに関する他のエネルギー損失にみまわれる。例えば、有機的シンチレーターと液体イオンチャンバーの両方は、ひどくイオン化する荷電粒子に対しては、縮められた応答を持つ。実際、これは陽子より軽い粒子に対してほとんど効果がない。陽子と他の原子核の断片に対して、そして有機的シンチレーターにおいて、中性子—陽子衝突からの陽子に対して最小イオン化信号に関する信号の減少が重要である。すべてこれら損失が同じ意味において、中性パイオンが生成されたときに生成される電磁的カスケードに比例して、強い相互作用する原子核部分に影響するということは、注目すべきことである。

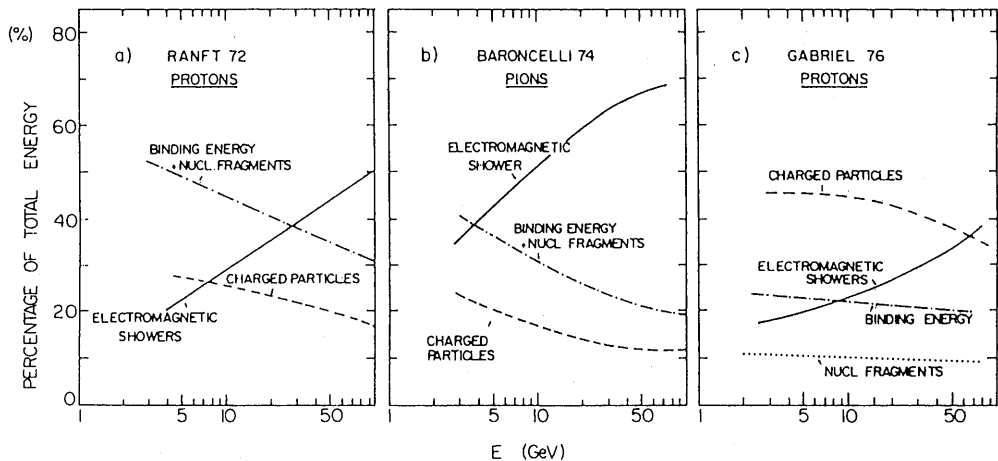


Figure 3 Relative contributions of the most important processes to the energy dissipated by hadronic showers.

ネット効果は、同一エネルギーの2つの強い相互作用粒子によって始められる2つのカスケードに対して、応答に大きな相違を生成するが、それらの1つは、そのエネルギーのほとんどを最初の相互作用において、中性パイオンに分配し、それらのうちのもう一方は、その最初の相互作用で、中性パイオンを生成しない。後の場合は、そのエネルギーを次につづく衝突で、多くのエネルギーが、中性パイオンのかたちで現われそうにない、比較的低いエネルギーの数個の核子に分散する。これら2つの場合の応答の相違は、鉄板に数枚の薄いプラスチックのシンチレーターが散在する最も簡単なふつうの種類の熱量測定器に対して、ほとんど2という因子がちがう。熱量測定器が、すべての荷電粒子に対して直線的な応答をする感度のよい物質の均一な区画からなっていてさえ、これらの場合において、約 $\frac{1}{3}$ の異なる応答がある。ナトリウムのヨウ化物の大きな結晶と、蓄えられた熱を測定する熱量測定器が2つの例である。一定の

エネルギーのビームに対する応答は、その応答において他の分散の源がないと仮定して、これらの2つの両極端の間にひろがる、結果的なエネルギー分解能は、同じエネルギーの電子又は光子からの電磁的シャワーの測定においてなされたそれと比較すると、全く貧弱なものである。入射粒子のエネルギーが増加するとき、第一の相互作用において粒子が生成される多数化は増加し、そしてこれら両極端の結果の一方の確率が減少するが、しかし対数的に減少するのみである。ほとんどの熱量測定器の分解能に対する他の限界はより速く減少するので、それゆえこの効果はエネルギーの広い範囲について、エネルギー分解能に対する限界を決定する。もし我々が、熱量測定器が強い相互作用をする粒子のというよりは、ジェットのエネルギーを決定するために用いられると仮定するならば、類似的の思考が適用される。基本的なクォーク又はグルーオンが強い相互作用をする粒子になるとき、パートンカスケードから結果的に生ずるジェットは、そのエネルギーのほとんどによって、強い相互作用をする粒子を導いて終わるのかもしれない。これは中性パイオン又は中性パイオンに崩壊する η であるか又は事象のほぼ半分を占める光子に崩壊する η であるかもしれないし、荷電粒子へ崩壊する η であるかもしれない。もう一度、物理実験の要求に合わない基本的な分解能極限があることを言おう。電子と強い相互作用をする粒子への等しくない応答の効果はFig 4に描かれている。20年前、ジェットと不足しているニュートリノエネルギーの予言された観察が厳然たる良いエネルギー分解能を持つ、強い相互作用をする粒子の熱量測定器を開発したが、実験の原形とされていた熱量測定器の不十分な操作に対する理由は、すぐには明らかにならない。それらはたびたびすべてのエネルギーをいれるための限界の大きさであり、不十分な結果に帰する技術的な限界を持っている。上記の効果が原因となる明らかな証拠はエネルギーをいれるのに適当な大きさの熱量測定器が作られたときに得られる。他の要求は、応対において、はっきりとした鋭い終点を示す十分な分解能を持つことである。これはすべてのエネルギーが電磁的粒子の中にあるときに生じ、Fig 5, Fig 6に示されているように、遅い応答側における、相対的に鋭い端を持つ。端の形は以下に議論する標本変動によって決定され、そしてこれはこの実験において直接測定される。原子核内部のカスケードを含むカスケードのよく知られた物理学に基づく強い相互作用を

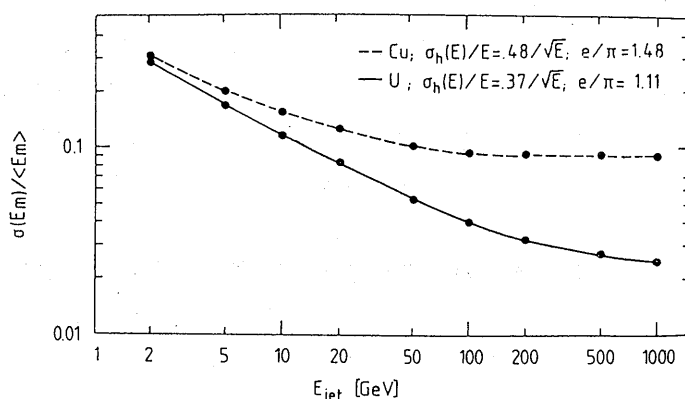


Figure 4 A simulation study of jet resolution for calorimeters with different resolution and electron-hadron response.

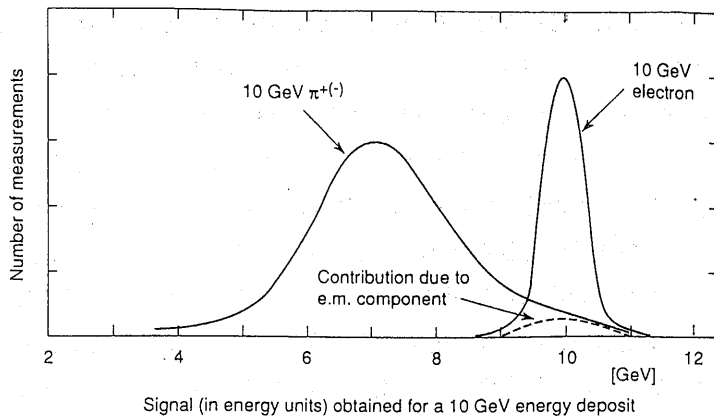


Figure 5 Conceptual view of the signal obtained for a 10 GeV energy deposit by electrons and pions.

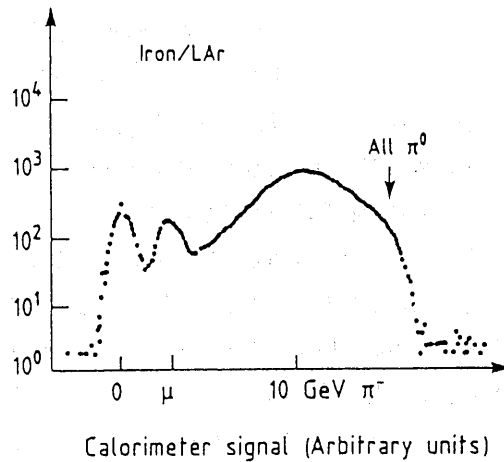


Figure 6 Experimental signals in arbitrary units for a liquid argon calorimeter with an iron absorber.

する粒子の応答を再生する詳細なコンピューター・シミュレーションが開発されている。

これは、エネルギーの保存則が実際に熱量測定器“古典的熱的”熱量測定器でさえ、蓄えられたエネルギーの正確な測定を与えるということを認めない場合であることを知る。エネルギーの誠実な測定の目的に合わせるために、観測にかからないエネルギーを補償する戦略の助けを求めなければならない。これらの数は次の章に記述されているように示される。

E 目に見えない強い相互作用をする粒子のエネルギーの補償

2つの両極端である前章において記述された、“原子核”と“電磁的”応答の間の相違を減小するために、我々はいくらか前者を増加し、後者を縮小しなければならないか、又は2つの種類の比の測定を準備し、適当な重さを付けて2つの和を取らなければならない。このように我々はこの問題を解く分類をしなければならない。

1 原核信号の増巾

(a) 原子核エネルギーそのものの増巾

強い相互作用粒子の、中性子に乏しいカスケードの原子核特有の成分は消散した粒子であることがわかった。これらは熱量測定器の原子核の分布に放射された中性子と陽子である。消散した陽子の数とエネルギーは中性子と密接に相関していることは明らかであろう、そして我々は中性子に焦点を合わせよう。もし我々がその典型的なエネルギーが数 MeV であるこれらの中性子を増巾することを考えるならば、すぐに実現するにちがいないのは、原子核反応器の中の“速い”中性子グループのエネルギー領域のみであり、必要とされる増巾をするために臨界下原子核分裂反応器を用いることを知らねばならない。必要とされる増巾は、純粋な電磁的シャワーの応答と同じ応答のみを与えるものであろう。原子核エネルギーの異なる型はすべて密接に相関しているので、エネルギーの応答が初期相互作用において、中間子が多い又は少ない性質に独立であり、ジェットの高い相互作用化やエネルギー分解能におけるこの変動の源を本質的に減少させることをこの増巾が確かにする。原子核分裂が示す便利な物質は、核エネルギー産業からの副産物として豊富に入手出来る質量238の消耗されたウラニウムの同位元素である。この物質において、自活する核反応をなしとげることが不可能であることがよく知られており、そして又このことは中性子の可能な増巾には限度があることを意味しているがしかし、それはほとんどの熱量測定器に応用するのに十分である。例えば、原子核カスケードの熱エネルギーは純粋ウラニウム238の区画にはじまり、古典的熱量測定器が測定する温度を補償するために我々が必要とするよりもっと多い、5という因子だけ増巾される。総エネルギーのほとんどは、大変短い範囲を持つ分裂断片の中へ放出される。それらはウラニウム板の間に挿入された媒体の中で信号が測定されるならば、検出されない。分裂断片の励起状態から低いエネルギー状態へ移るときに放射される光子や速い中性子のような、イオン化の測定がよりしやすい形で、約10倍のエネルギーが現われる。すべての中性子の運命は捕獲されることであり、それゆえ感度の良い物質中でそれらが散乱されようとされなかつと、それらは光子を捕獲する。詳しい計算は Fig 7 に示されているように示されているが、この方法はたいへん有効である。

(b) 選択された標本によって原子核信号を与える。

標本の媒体から信号が得られるとき、信号を惹起する原子核エネルギーの断片が、電磁的シャワーによって蓄えられたエネルギーに対するよりも大きいように準備することによって、原子核部分の信号が相対的に増加することが可能になる。総原子核エネルギーに相関的にもう一度速い中性子に与えられるエネルギーは、この目的に対して入手出来る武器である。強い相互作用をする粒子について中性子散乱に対する断面積は、核分裂からの中性子によって母集団を形成している (1MeV-10MeV) の中性子エネルギーの領域のみにおいて非常に大きい。水素を含む物質における反跳陽子の測定は、これら中性子の選択的検出に対する技術を提供する。中性子散乱に対する断面積は大きいので、例えば1又は2ミリメートルの有機的プラスチックが数ミリメートルのより密度の大きい鉄よりも、これら中性子のより大きい断片を吸収する。一方、電磁的シャワーからのイオン化に対する応答が、不活性と活性の層の質量比により

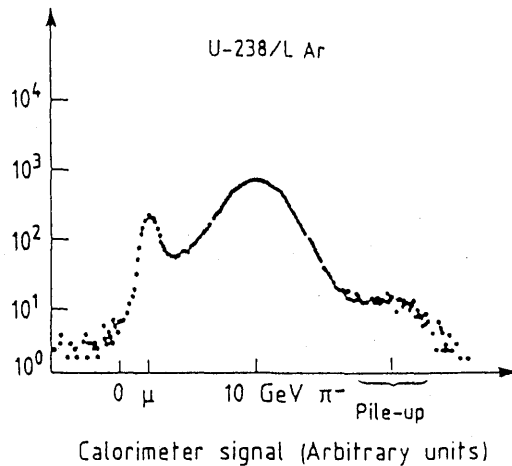


Figure 7 As in Figure 4 but with the iron absorber replaced with uranium.

多く比例している。この方法において、相対的に励起された原子核信号が得られる。この効果は、すべての蓄えられたエネルギーの断片が10%に等しいか又は、小さく10%以下であるときに大きい。これは、標本変動からの分解能の限界に導くがしかし、これら標本変動は補償される原子核変動よりも重要なものではない。Fig 8 に、分解能が電子と、強い相互作用をする粒子の相対的な応答に密接に関連していることを良く編集したグラフが示されている。シンチレーター体積の小さな断片を持つウラニウム熱量測定器では、補償されすぎるむきがあり、この

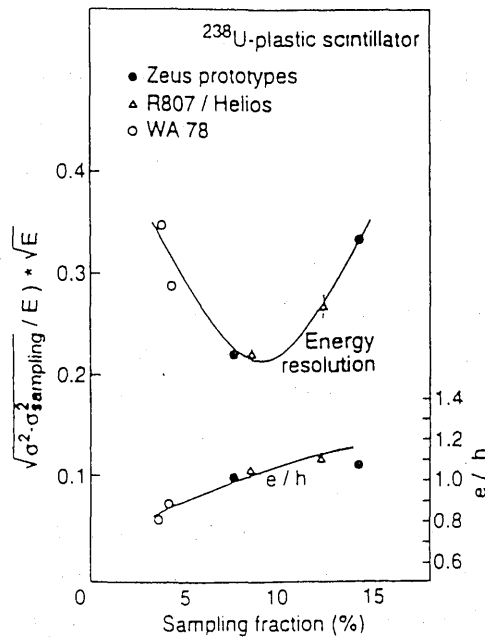


Figure 8 The resolution in uranium-scintillator calorimeters as a function of the fraction of the volume which is scintillator. The ratio of response to electrons and hadrons is also shown, and one sees that the resolution has a minimum at the sampling fraction where this ratio is equal to one.

ことは分解能に対しては、補償されないのと同様に良くない。

2 電磁的信号を減ずる

我々はエネルギーの蓄えに対する感度のための標準目盛として、イオン化されたミュオンの飛跡をとる。電磁的シャワーからの信号が標準と比べて十分縮小されるならば、補償が得られる。この標準は、運動量のわかっているミュオンに対するよく知られたエネルギー蓄積スペクトルを持つ、ミュオンエネルギーのエネルギー損失によって実験的に制定されたものである。原子核相互作用のない範囲の終りに来て観察された陽子によるエネルギー損失が又用いられうる。標本熱量測定器は、この仕方で正確に目盛られており、与えられたエネルギーの電磁的シャワーは、期待されたより小さな信号を与えることがわかった。それぞれ2ミリメートルの厚さの鉛の板と液体アルゴンの熱量測定器に対しては、効果は約40%である。これは驚くべきことであるのは、電磁的シャワーによって蓄えられた純イオン化モデルは、与えられたエネルギー損失に対して、同じイオン化を導くからである。大きなナトリウムのヨウ化物結晶のような、電磁的シャワー全体を含むことの出来る均一熱量測定器は、実際、電子とミュオンに等しい応答を与える。効果は、高い原子番号の吸収体において、主に大きい光電効果によると、今、理解されるからである。効果的なエネルギー損失を与えて、吸収体の板から逃れずに、光電子を導く数 KeV に到るまでの光子が度々吸収される。低エネルギー電子の多数回散乱は又一つの役割を演じている。シャワーの初めの光子のエネルギーに比べて、これらのエネルギーは大変小さくみえるか、又は、特徴的なエネルギーとしてたびたび用いられるシャワーにおける臨界エネルギーと比べてさえも、これらのエネルギーは小さく見える。これは典型的な吸収物質に対して約10MeV である。大変低いエネルギーで最終的なエネルギー損失が起こっているという説明である。最近のシミュレーションがこれら効果を再現している。

実際にこれは、標本熱量測定器において、鉛又はウランウムの吸収板を用いることによってかなりの程度補償されることを意味している。ウランウムの場合に対しては、この効果と原子核分裂の両方に増巾作用がある。ウランウムと鉄と銅の吸収体熱量測定器に対する結果の編集は Fig 9 に示されている。

3 強い相互作用と電磁的相互作用の比の測定と修正

(a) 空間的特性による

熱量測定器に入射する高エネルギー粒子の相互作用によって生成された2次粒子のカスケードの典型的な空間的特性は吸収体が大きな原子番号を持つならば、電磁的粒子や電子や光子の間で大きく変化する。これは主に、原子核相互作用長の輻射長に対する比によっており、これはウランウムでは33という値に達する。これは与えられた粒子によるはじめの数輻射長に蓄えられたエネルギーの断片を測定することによって、熱量測定器中の電磁的粒子の分離に対する基礎として用いられている。この技術は入射粒子の最もエネルギー的な2次相互作用における、電磁的かつ強い相互作用のエネルギーの相対的な統計の決定に拡張される。十分に高い原子番号の熱量測定器を考えているので、輻射長は鉄やより重い原子の相互作用より短い。熱量測定器をたくさんの小さな体積要素において、3次元で読むように操作しよう、そして一方は

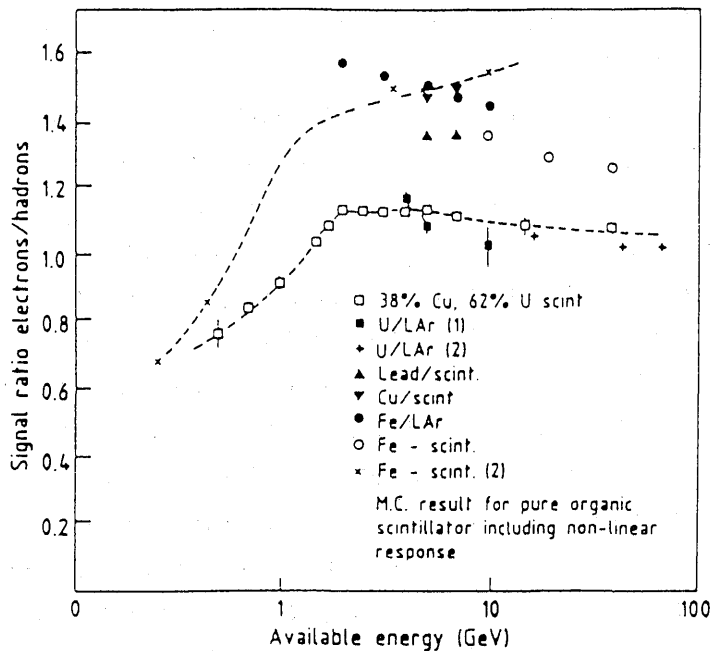


Figure 9 The ratio of signals from electrons and hadrons of the same momentum in calorimeters of different types.

エネルギー的な中性パイオンにそのエネルギーのほとんどを与える相互作用で、他方は中性パイオンのとばしい相互作用で始まる電磁的型においてそのエネルギーのほとんどを蓄える、2つの強い相互作用をする粒子によって、蓄えられたエネルギーの相対的空間的分布を考えよう。2次粒子は、平均的に縦方向や横方向にひろがる空間的にややむらのないエネルギーの蓄積を与え、一方、一次粒子は蓄えられたエネルギーの高密度の小さな局所的な領域を示す。あきらかに区別は、相互作用点の位置での空間的変動によってぼやかされるので、ある統計的特性を持つ。データーとシミュレーションの両方による注意深い仕事は約2という因子の補償されない熱量測定器の変動を減ずる実際的な空間的一部分を持つ熱量測定器でうまくやっていく算術を与える。

さて我々が強い相互作用をする粒子と光子の両方で構成されている、単一の強い相互作用をする粒子ばかりでなく、粒子のジェットをも測定したいと考えていると考えよう。エネルギー貯蓄の形の“衝突”を認識することに基づく算術を用いる同じ技術は、単一の強い相互作用をする粒子の分解能に匹敵するジェット分解能を与えることが知られている。この解の費用は十分な粒状化をする強い相互作用の熱量測定器における音読チャンネルを多数要求することにある。多くの実験的設計において、このチャンネルの数の増加は、ほとんどのチャンネルが如何なる場合においても、電磁的測定器の中にあるので、そんなに目立たない。

(b) 時間的特性によって

原子核エネルギーの蓄えに相関する速い中性子によって運ばれるエネルギーは、電磁的シャワーによるよりも、異なる時間の応答を与える。電子と光子は光の速さで運動し、中性子は平

均して $\frac{1}{5}$ の大きさの速さである。このことは、応答時間に10～20nsの相違を生ずる。この相違は Fig 10 に示されているように、速い応答を持つ熱量測定器で測定することができる。ウラニウム・シンチレーター熱量測定器において、 $\frac{200\text{ns}}{100\text{ns}}$, $\frac{400\text{ns}}{100\text{ns}}$, $\frac{1\mu\text{s}}{100\text{ns}}$, $\frac{3\mu\text{s}}{100\text{ns}}$ に対する電子とパイオンからの信号の応答時間の相違である。もし感度の良い物質が有機的シンチレーションであるならば、Fig 11 に示されるように、中性子散乱から、たてこんだイオン化によって励起された陽子が反跳するとき、相対的により大きい、約 $1\mu\text{s}$ の一定時間にシンチレーション光の成分がある。

(c) 2つのデーターの微分的応答によって

標本熱量測定器は、電磁的シャワーの中で相対論的な電子と原子核部分の相互作用における遅い粒子の成分に異なる応答をする敏感な2つの層によって構成されている。これら2つの種類がカスケードの局所部分をほとんど等しく標準化する、間に白紙を挟む構造を、2つの種類の検出器が交互に生成する。2つの検出器の重みをつけた和は、もし重みが適当に選択されていれば、補われた応答を与えることの出来る総エネルギーの測定を与える。

(i) 2つのイオンチャンバー

この計画を単純に話せば、正確に同じ構造を持つ、間に白紙をはさむ2つの検出器を用いて、遅い粒子や相対論的粒子に対して異なる応答を生ずる異なる条件のもとでそれら进行操作することである。イオン化チャンバーにおいて、イオンの再結合は、遅い粒子からのイオン化のより高い密度に対してより大きい。再結合は又、より高い場によって減じられ、イオンを集めるた

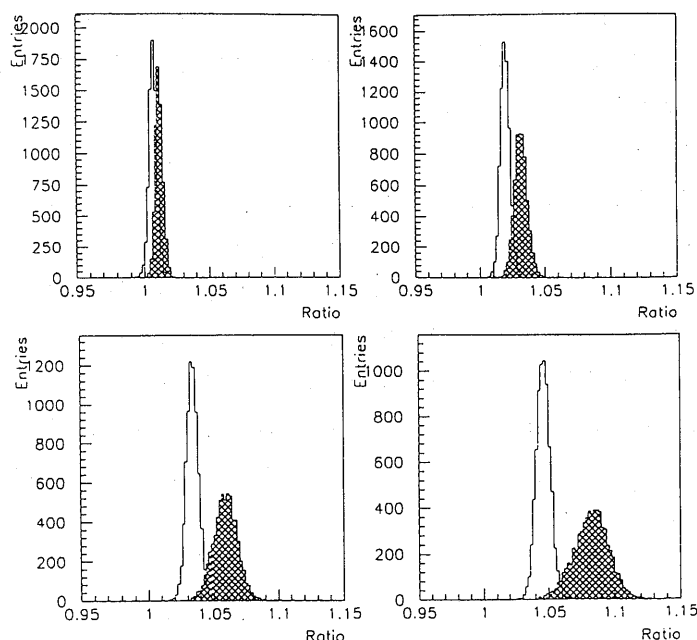


Figure 10 Measurement of the different time response of the signals from electrons and pions in a uranium-scintillator calorimeter, for 200ns/100ns, 400ns/100ns, 1μs/100ns, 3μs/100ns.

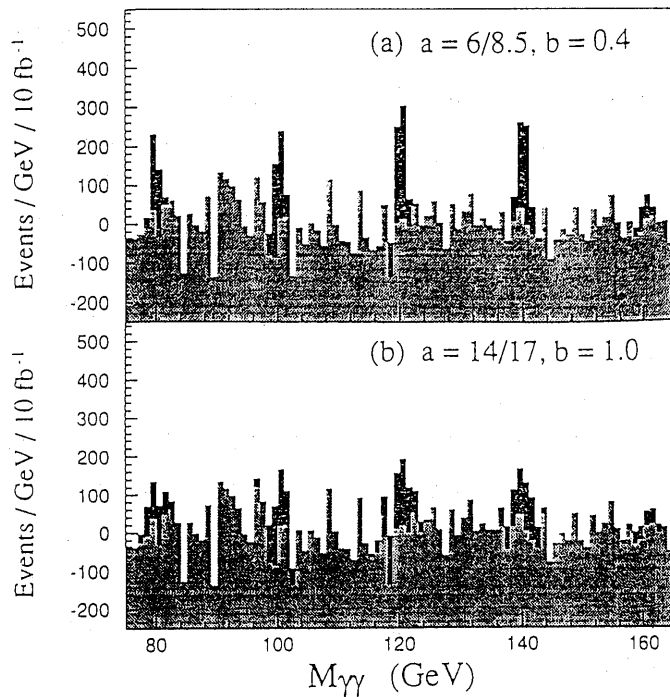


Figure 11 Simulation of the signal from the Higgs particle decay to two photons with the irreducible background due to the QCD process producing a two photon continuum subtracted, but reflected in the errors, for different mass values and two different calorimeter resolutions.

めに用いられる電場の関数である。吸収体間のイオンチャンバーのギャップは、間に白紙をはさむ検出器からの応答における望ましい相違を高い集団電圧と低い集団電圧に交互に与える。

(ロ) チェレンコフ光対シンチレーション

標本熱量測定器は、プラスチックのシンチレーターの薄い板による密度の濃い吸収体の薄い板をとこところに入れてしばしば作られる。シンチレーターはすべての種類の粒子によるイオン化を記録する。もしプラスチックシンチレーターの代わりに透明なプラスチックの薄い板を用いるならば、チェレンコフ放射によってなお光を発する。電磁的シャワー中の電子はこのチェレンコフしきい値より上にある。強い相互作用をする粒子のカスケードはチェレンコフしきい値より上の相対的にエネルギーの低いたくさんの陽子を含む。熱量測定器はそれぞれの標本細胞において、シンチレーターとチェレンコフ放熱器によって作られている。シンチレーション光とチェレンコフ光の総計の比は、個々のカスケードにおける強い相互作用のエネルギーの断片とともに増加する。

F どのようにして信号を得るか

1 石の中での状態

空中から表面に入ってきて、そしてすべての粒子が吸収されるまでカスケードする粒子のあ

る固体体積としての熱量測定を考えることが出来る。カスケードの平均の型は円垂形で、その頂点は粒子の入射点であるか又はその最初の相互作用点である。底面はカスケードの終点である。円垂の張る角度は基礎過程の横方向運動量と多数回の散乱によって決まる。それは強い相互作用をする粒子のシャワーに対してより大きいのは、シャワー中の強い相互作用過程において、単一の強い相互作用過程と比べて、横方向運動量が相対的に大きいからである。

円垂の内部に、入射粒子の位置と方向について感知出来る情報を得るために用いることの出来る蓄積されたエネルギーの高い密度の一つの中心的な心がある。低いエネルギー密度を持つ尾っぽを含める円垂中のすべてのエネルギーは粒子のエネルギーの正確な測定を与えるために加え合わされなければならない。横方向と縦方向のエネルギー蓄積情報は、電磁的粒子と強い相互作用をする粒子の区別をはっきりさせるために用いられる。その範囲全体にわたるエネルギー蓄積のなめらかさが前節に記述されたエネルギーの補償を得るための技術である。他の検出器系からのミュオンの正体を確かにするのを助けるために、熱量測定器をとうして、ミュオンの飛跡を追跡する多くの実験においてそれは重要である。これは又、熱量測定器をとうる前と後で追跡する系からミュオンの候補を鎖状に連結する助けをする。ミュオンに数 GeV を与える物質中の電子と衝突するこれら数多くの場合において、ミュオンによるエネルギー損失を測定することが必要である。ミュオンは一般的に熱量測定器の一區画に数百 MeV のみ蓄える。もし、ミュオンのイオン化による信号が小さな体積容素において測定されるならば、この大きさのエネルギーの蓄えによって占められる、その体積のかなりの断片を持つことの出来る熱量測定器によって飛跡を追跡することは可能である。

熱量測定器の仕事は、それに入射するエネルギーを単純に測定する以上のものであることがわかる。それは空間的かつ方向的測定に対する等しく切迫した要求であろう。物理学が要求するエネルギーと空間と方向の分解能についての種類わけの間の調和を確立する方法は次の章で示される。明らかに熱量測定器は単一粒子のエネルギーの蓄えの和による一様な固体体積からはほど遠いがしかし、エネルギー分解能のために要求された正確さに対しては、一様体積を表わす。それぞれの個々のカスケードの型は物質の内部の密度の高い區画に存在する。それらは簡単には入手出来ない。実験的熱量測定の問題は、熱量測定器の体積の密度と一様性を維持している間に、3次元エネルギー蓄積信号にどのように我々の手を触れ、そして次の事象が到達する前に入手出来る時間内にどのようにするかということである。

2 最近の高エネルギー実験の物理的要求

ある最近の実験は、専門化され、与えられた種類の粒子についての最良の仕事を要求する。一つの例は、高エネルギー中性カオンが多数の光子状態に崩壊する研究であり、ここで重要な要求は、速い速度で近くに空間的にある電磁的シャワーのエネルギーと位置の一つの精密な測定である。しかしながら、実験的努力の主たる部分はスペクトロメーターの一般的な目的に焦点があてられ、特に衝突ビームの設備であり、そして目的は、すべての粒子を測定することであり、また生成されたがすこしも相互作用をしない粒子の存在を暗示しさえもするという事である。これははっきりとした、そしてしばしば矛盾した要求にみちびく。我々はスペクトロ

メーターの一般的目的に対して、それぞれ満たされねばならない測定のもの3つの異なる型に対する要求を以下に示す。

(a) 超高精密度電磁的熱量測定器

我々は電磁的カスケードシャワーが正確な測定をされていることが認められていることを知った。それらは、エネルギーの目に見えない型に欠けており、又標本仮定をよく満たしている。標本化による確率変動の減少する重要性と共にこれは系統的効果によって究極的に限定される、高エネルギーでの非常に高度な正確さの可能性へと導く。これは、磁場の中での屈接による荷電粒子の測定と対称的であり、運動量が増すときに正確さはより困難で高価なものとなる。実際、これは光子と電子がより正確に測定されうるし、磁気的スペクトロメーターによってのみ測定されうる荷電ミューオンよりも費用がかからないことを意味する。過去において、自然は常に入手出来るエネルギー分解能に匹敵するか又はそれより狭いエネルギー巾を持つ興味ある不安定粒子を常に用意している。これは異なる質量を持ち、異なる分解能の検出器によるこの粒子のシミュレートされた質量スペクトルによって描かれている Fig 11 の大変小さな巾を持つ2つの光子に崩壊するヒッグス粒子とともに、衝突実験の新しい世代において、これは継続される。他の場合は、2個の電子に崩壊する、可能な重いZの再現である。これら特殊な場合は大きな系で到達する限界よりも1%か2%良いエネルギー分解能を持つ電磁的熱量測定器の開発のための集中的な努力へと導く。この分解能は高エネルギー、高速のもとでCERNで建設されようとしている Large Hardron Collider のような実験を達成するであろう。

- ・約20m²の領域の全立体角検出器
- ・数mmの正確さでの光子や電子の位置の測定
- ・高エネルギーの限界において数ミリラジアンでの光子の角度の測定
(バンチの交差ごとの多数の事象の中での正確な起源についての知識なしで2個の光子の有効質量の計算を与える。)
- ・2つの光子に崩壊する中性パイオンから単一光子を分離する能力、ここで2つの光子が非常に接近していっしょに検出器にかかる。
- ・継続するバンチの間が約25nsである交差するそれぞれのビームにおける多数の事象
- ・次の章で記述されるように、ジェットとエネルギー損失の同時測定に対する要求
- ・1%の断片に対するエネルギー目盛の安定性と一様性

上にリストされた一つ一つの条件の多くは、達成するのがむずかしい。

(b) ジェットの測定

最近の熱量測定のはとんどの応用は、高い精度の単一の強い相互作用をする粒子の測定を含まない。ほとんどの衝突実験は衝突体積の外側に強い相互作用をする素粒子やクォークやグルーオンの型でその中にあらわれる。クォークの断片的な荷電は、本来のクォークの運動量を正確に運ぶジェットの中の強い相互作用をする粒子の組を決して検証しえないことを暗示している。基礎の構成要素に対する量が、それによって測定されうる正確さを限定しなければならないエネルギーと方向における不確定性をジェットの検証が含んでいる。この考察はこの目的の

ために用いられた熱量測定器の強い相互作用をする粒子のふるまいにおける精度がジェットの定義の正確さと同じくらいよく必要とされることを示している。要求されるエネルギー分解能は、高エネルギージェットに対しては数%である。これは電磁的粒子に対して得られる分解能よりも大ききの順序がほとんどより大きい。必要とされる位置分解能は到達するのにむずかしいものではなく、又方向の測定は強い相互作用をする粒子に対して常に要求されない。深さにおける小分は熱量測定器をとうして次のミューオンに役立つ。エネルギー分解能に対するゴールに達するに十分な程度までエネルギーを吸収することを要求する深さは相互作用長の5倍である。熱量測定器の裏面から出るエネルギーがあるとはいえども、変動はジェットに比べて十分小さいので、次に考察されるべき話題の中で、それらは重要ではあるが、エネルギー分解能を限定しない。

(c) 中性の弱い相互作用損失

最近の実験において、興味ある反応の多くは、 $W \rightarrow e^+ \nu$ の崩壊又は荷電を持たない、スーパーシンメトリーで予言されているような弱い相互作用のみをする粒子への崩壊からのエネルギー的ニュートリノの放出を含んでいる。それらは荷電を持つか又は相互作用をしているすべての粒子を測定することによって、又エネルギーと運動量の損失を推測するために、初期エネルギーとエネルギーの保存則を用いることによって検出されよう。これはちょうど β -崩壊におけるニュートリノの存在を確立した古典的な熱量測定器による古い実験のようであるが、しかし現在我々は、ニュートリノを各事象に見ている。これは、我々が密閉熱量測定器と呼んでいる、すべてのエネルギーが含まれている固定標的実験において最もしやすい。衝突ビーム実験において、ビームパイプのために、熱量測定器の中に穴がなければならないので、熱量測定器は本当は密閉されていない。穴は総立体角の 10^{-5} 程度の大きさの大変小さな断片なので、ビームに垂直な運動量の成分はなお検出可能である。

この測定に対して、相互作用長の5倍以上に侵入するまれなエネルギー粒子は、ジェット分解能関数の尾っぽ部分において、それらが重要ではないにもかかわらず、重要なバックグラウンドを与えている。熱量測定における9倍又は10倍の相互作用長は2つの効果を取るにたらないものにし、そして数-TeV陽子衝突器におけるビームの方向においてはもっと微少なものにしている。

3 熱量測定器を音読する技術

(a) 光の信号による

シンチレーション光はイオン化仮定によってエネルギーと関連付けられているが、特に効果のよい大きな体積において、熱量測定器音読の大変自然な方法である。物理学の要求によって、指示された良い区分化の重要性が与えられ、熱量測定器の体積の内部から光の信号を持ち出すことを我々に許すよい技術になっている。これは鍵になる問題なので、厳密さへの挑戦はこの特殊な技術によって操作されている熱量測定器のすべての仕事の断片に多く依っている。大変良い粒状化は熱量測定器の前面で要求され、そこでは位置と方向と縦方向区分化に対する必要性によって電磁的シャワーが測定される。度々この種類の熱量測定器は、シャワーの電磁的部

分を記録する、ある他の方法に従って熱量測定器の強い相互作用部分に用いられている。この場合、音読問題には悩まされない。すべての場合において、しかしながら体積の内部から出る信号の問題がある。解は、ある種の光誘導装置に基づいており、この光誘導装置は、多くの減衰なしで、光信号をかなりの距離まで運ぶ。それらは検出器の領域の小さな断片のみを取り、その結果人は熱量測定器の外面の外側へ多くの音読チャンネルを持ち出す自由を持つ。光の誘導装置は薄い細長い板であるか又は細い繊維である。

2つの可能性は、シンチレーション光が細い繊維の中に信号を生成する、シンチレーション・ファイバーを用いよ。細い繊維の光誘導受領器の範囲内で光の一部分は有効的に細い繊維の終点まで運ばれる。これは“スパゲッティー熱量測定器”として知られている。

Fig 12 に示されているように、液体又はプラスチックの薄い板を用いよ。そして光を光誘導装置に結合せよ。このことは、細い繊維の中に置けるよりも多くのシンチレーターを用い、潜在的に大きな信号を与えることが出来るということを認めている。位相空間の保存のために、小さな角の細い繊維への大領域シンチレーターからの結合光に困難がある。この問題は、波長変化の技術によって回避することが出来、ここでシンチレーターから放射された光の帯は細い繊維の中の染料によって吸収され、より長い波長で等方的に再放射される。変化された光は光誘導受領器の範囲内で放射され、終点へ運ばれる。もしシンチレーター板の一端が波長を変化させる光誘導装置によって覆れているならば、端からあらわれる陽子の数の約 $\frac{1}{5}$ が受領装置により長い波長で再び現れる。光は、光多数化装置によって音読され、これは小さな電気的雑音によって高速度を持つ広い力学的範囲を用意することが出来る。小さな細い繊維の大きな数の音読は、多数陽極の光多数化装置の使用が出来ることを暗示している。多くの熱量測定装置の応用が磁場の公差を要求するので、他の光検出器が考案されねばならない。0.1T までの場合は通常の光多数化装置の使用を認めるに十分なほどよく遮蔽される。特殊な光多数化装置は、もし磁場に関する方位測定が是正されれば、1T までの有用な利得を与えるであろう。多数化装置の利得が降下するとき、前面の終点の電子の動作はきわめて重大になる。より高い場において、額面以上にぎっしりつまっているとき、そして光検出器が熱量測定器の体積の中に埋

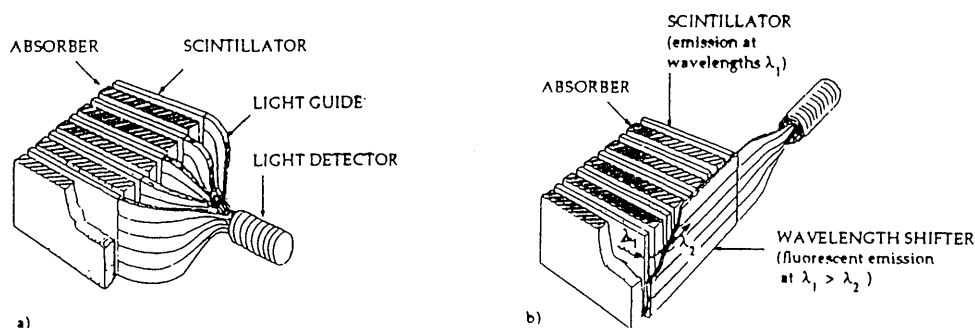


Figure 12 Schematic illustration of the method of calorimeter readout by scintillating plates, with and without the use of wavelength-shifting sheets.

められているとき、人は固体光検出器を用いるにちがいない。利得を持った光検出器を用いることは、必要でさえあるかもしれない。この場合、雑音と許容量と光検出器を横切る粒子からの信号の問題が考えられねばならない。これら応用の詳細は細かく立案されつつある。

(b) 電気的信号による

もし熱量測定器の信号がイオン化荷電の収集であるならば、信号は伝達線上で取り出されうる。速い応答は、伝達線が低い誘導係数を持つことを要求し、そしてこれはややかさばったケーブルに中継される。巧妙な解がこの問題に対して開発された。1つは伝達線として、イオンチャンバーの電極をその上に用いている“アコーディオン熱量測定器”幾何学で、Fig 13の電磁的熱量測定器の前面と後方に信号を運ぶ。アコーディオンのジグザグの形は、入射粒子の方向にそう、イオンチャンバーの尖端によって形成される裂け目を避ける。2つ以上の区画が前面と後方の電極の下に埋められた他の伝達線とともに多重印刷回路板を用いることによって音読される。信号が前方の信号として出て来るという事実は、一方向には小さく、もう一方には大きい有効な槽を形成するために用いられた設計を示しており、Fig 14によって図解されているように、関係のある重要な問題を取り扱うのに非常に融通がきく。そのような非対称性は、ビームにそって長く、しかし垂直方向に狭い、衝突器における相互作用領域を考慮に入れる習慣がある。

アコーディオン構造は、ある線は他の線が中心を通るときに、ジグザグの頂点にそって通るので、明らかな非一様性を生ずる。注意深いシミュレーションは、それが選択された正確な幾何学的変数によっていることを示している。これは変数の慎重な選択が一次の非一様性を消去することを意味している。一様性と、このようにこの電極的構造の物理学的動作学が、人が期

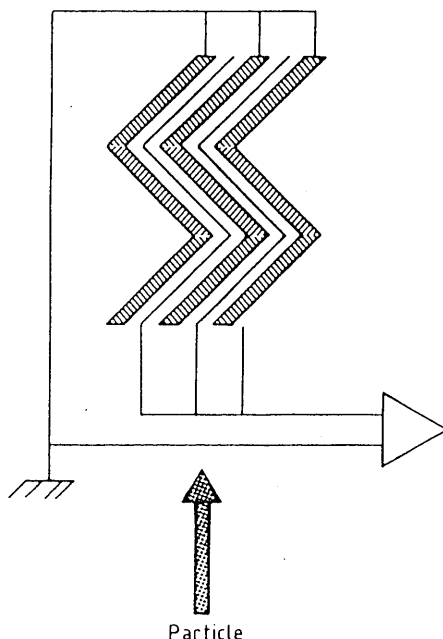


Figure 13 The “accordion” geometry for liquid ionization calorimeter readout.

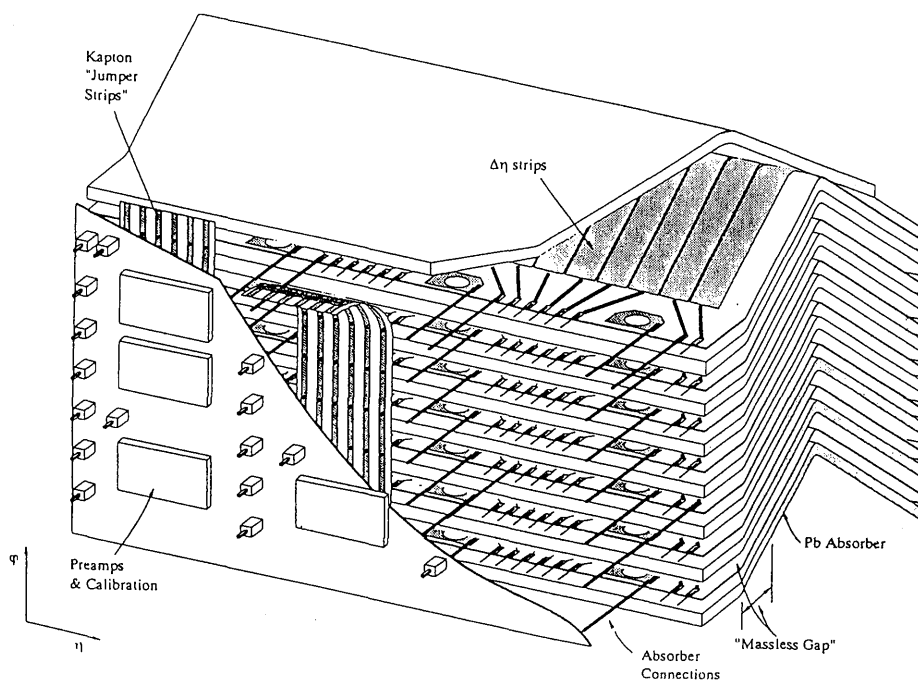


Figure 14 An illustration of development of the accordion geometry adapted to provide a fine-grained readout with strips. These provide a precise measurement of the direction in the polar angle.

待するよりもっと良いのはこの理由のためである。シミュレーションは、この構造に受け継がれた内部確率項のあることを示しており、 $\frac{\text{数}\%}{\sqrt{E}}$ の大きさである。これは標本変動より小さい。

参考文献

Thomas Ferbel 編 “*Techniques and Concepts of High-Energy Physics VIII*” の P. 171

William J. Willis 著 “*New Directions in Calorimetry*”

出版社 Plenum Press N. Y. and London

Published in cooperation with NATO

Scientific Affairs Division

(原稿受理1996年12月6日)